

**SIMULASI NUMERIK PERPINDAHAN PANAS 2 DIMENSI  
PADA PROSES PENDINGINAN TEMBAGA MURNI  
DENGAN VARIASI CETAKAN PASIR DAN MULLITE  
MENGUNAKAN PENDEKATAN BEDA HINGGA**

**SKRIPSI**

Diajukan sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar  
Sarjana Teknik



Oleh :

JOKO SUPRIYANTO  
NIM. I 0409026

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SEBELAS MARET  
SURAKARTA  
2013**



KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS SEBELAS MARET - FAKULTAS TEKNIK  
**JURUSAN TEKNIK MESIN**

Jl. Ir. Sutami 36A Surakarta 57126 tlp. 0271 632163 email: mesinfuns@uns.ac.id

**SURAT TUGAS PEMBIMBING DAN PENGUJI TUGAS AKHIR**  
**PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN UNS**  
Program Studi : **S1 Reguler**  
Nomor : **0486/TA/S1/07/2013**

Nama : **JOKO SUPRIYANTO**  
NIM : **10409026**  
Bidang : **Konversi Energi**  
Pembimbing 1 : **EKO PRASETYO B., ST, MT/197109261999031002**  
Pembimbing 2 : **PURWADI JOKO WIDODO, ST, M. KOM/197301261997021001**  
Penguji : **1. Dr. DWI ARIES HIMAWANTO, ST, MT/ 197403262000031001**  
**2. D. DANARDONO, ST, MT, PhD/ 196905141999031001**  
**3. /**  
Mata Kuliah Pendukung  
**1. KOMPUTASI PERPINDAHAN PANAS (MS06053-10)**  
**2. POMPA DAN KOMPRESOR (MS06103-10)**  
**3. ENERGI SURYA (MS06093-10)**

Judul Tugas Akhir

**"SIMULASI NUMERIK PERPINDAHAN PANAS 2 DIMENSI  
PADA PROSES PENDINGINAN TEMBAGA MURNI  
DENGAN VARIASI CETAKAN PASIR DAN MULLITE  
MENGGUNAKAN PENDEKATAN BEDA HINGGA"**

Surakarta, 2013-07-16 11:44:38  
Ketua Jurusan Teknik Mesin,



**DIDIK DJOKO SUSILO, ST, MT**  
NIP. 197203131997021001

Tembusan :


1. Mahasiswa ybs.
2. Dosen Pembimbing TA ybs.
3. Koordinator TA.
4. Arsip.

*commit to user*

## HALAMAN PENGESAHAN

**SIMULASI NUMERIK PERPINDAHAN PANAS 2 DIMENSI  
PADA PROSES PENDINGINAN TEMBAGA MURNI  
DENGAN VARIASI CETAKAN PASIR DAN MULLITE  
MENGUNAKAN PENDEKATAN BEDA HINGGA**

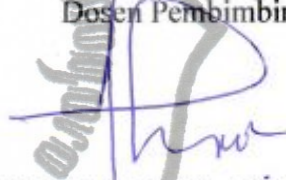
Disusun oleh

  
Joko Supriyanto  
NIM. 10409026

Dosen Pembimbing I

  
Eko Prasetyo B., ST, MT  
NIP. 197109261999031002

Dosen Pembimbing II

  
Purwadi Joko W., ST, M. KOM  
NIP. 197301261997021001


Telah dipertahankan di hadapan Tim Dosen Penguji pada hari Senin tanggal 21  
Oktober 2013

1. D. Danardono, ST, MT, PhD  
NIP. 196905141999031001
2. Dr. Dwi Aries Himawanto, ST, MT  
NIP. 197403262000031001


  
.....  
  
.....

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin

  
Didik Djoko Susilo, ST, MT  
NIP. 197203131997021001

Koordinator Tugas Akhir

  
Wahyu Purwo Raharjo, ST, MT  
NIP. 197202292000121001

## PERSEMBAHAN

Dengan segala kerendahan hati seraya mengucapkan syukur kehadiran Illahi, kupersembahkan tulisan ini kepada :

1. Allah SWT, pemilik segala keagungan, kemuliaan, kekuatan dan keperkasaan. Segala yang kualami adalah kehendak-Mu, semua yang kuhadapi adalah kemauan-Mu, segala puji hanya bagi-Mu, ya Allah, pengatur alam semesta, tempat bergantung segala sesuatu, tempatku memohon pertolongan.
2. Junjungan Nabi besar Muhammad SAW, Manusia terbaik di muka bumi, uswatunhasanah, penyempurna akhlak, shollawat serta salam semoga selalu tercurah padanya, keluarga, sahabat dan pengikutnya yang istiqomah sampai akhir zaman.
3. Kasih sayang dan cinta yang tak pernah putus dari Bapak, Ibu, dan semua keluarga tercinta. Kasih sayang kalian tak akan pernah kulupakan sepanjang hidupku.
4. Pak Eko P.B. dan Pak Purwadi J.W yang bersedia membimbing saya dalam menyelesaikan tugas akhir.
5. Seluruh dosen, karyawan, dan mahasiswa Teknik Mesin UNS.



**Simulasi Numerik Perpindahan Panas 2 Dimensi Pada  
Proses Pendinginan Tembaga Murni Dengan Variasi  
Cetakan Pasir dan Mullite Menggunakan Pendekatan  
Beda Hingga**

**Joko Supriyanto**

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret

Surakarta, Indonesia

E-mail : joko\_supriyanto65@yahoo.com

Abstrak

Simulasi perpindahan panas pada proses pendinginan tembaga murni dilakukan untuk mengetahui perpindahan panas konduksi yang merambat melalui cetakan pasir maupun cetakan mullite dengan kondisi batas konveksi. Simulasi dilakukan dengan menyelesaikan persamaan atur konduksi dengan kondisi batas konveksi menggunakan pendekatan beda hingga (*finite different*). Pendekatan beda hingga dilakukan dengan menyelesaikan persamaan atur perpindahan panas konduksi menggunakan metode ADI untuk perhitungan persamaan konduksi 2 dimensi. Metode beda hingga diselesaikan dengan perangkat lunak Fortran Power Station 4.0 dan Matlab 7.8. Hasil simulasi menunjukkan tembaga murni yang didinginkan menggunakan cetakan mullite akan lebih cepat dingin dibandingkan dengan tembaga murni yang didinginkan menggunakan cetakan pasir.

Kata kunci : perpindahan panas, konduksi, metode beda hingga, pendinginan logam

***Numerical Simulation of Heat Transfer 2 Dimensional  
On the Cooling Process Pure Copper With  
Sand and Mullite molds Variations  
Using Finite Different Approach***

*Joko Supriyanto  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering, Sebelas Maret University  
Surakarta, Indonesia  
E-mail: joko\_supriyanto65@yahoo.com*

*Abstract*

*Heat transfer simulation on cooling process of pure copper was performed to determine the conduction of heat transfer that propagate through the sand mold or mullite mold with convection boundary conditions. Simulation was done by solving the conduction equation with convection boundary condition using finite difference approach. The finite difference approach was done by solving the conduction equation of heat transfer using ADI method for the calculation of the 2 dimension of conduction equations. The finite difference method solved by Fortran Power Station 4.0 and Matlab 7.8 software. The simulation results show that pure copper cooled using mullite mold will be cool faster than using sand molds.*

*Keywords: heat transfer, conduction, finite difference method, the metal cooling*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah penulis haturkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan Skripsi “ Simulasi Numerik Perpindahan Panas 2 Dimensi Pada Proses Pendinginan Tembaga Murni Dengan Variasi Cetakan Pasir dan Mullite Menggunakan Pendekatan Beda Hingga ” ini dengan baik. Skripsi ini disusun guna memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Dalam Penyelesaian Skripsi ini tidaklah mungkin dapat terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak, baik secara langsung ataupun tidak langsung. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih yang sebesar besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan Skripsi ini, terutama kepada :

1. Bapak Eko Prasetyo B., ST, MT, selaku Pembimbing I atas bimbingannya hingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.
2. Bapak Purwadi Joko Widodo., ST, M. KOM, selaku Pembimbing II yang telah turut serta memberikan bimbingan yang berharga bagi penulis.
3. Bapak D. Danardono, ST, MT, PhD dan bapak Dr. Dwi Aries Himawanto, ST, MT selaku dosen penguji tugas akhir saya yang telah memberi saran yang membangun.
4. Bapak Ir. Agustinus Sujono, MT, selaku Pembimbing Akademis yang telah menggantikan sebagai orang tua penulis dalam menyelesaikan studi di Universitas Sebelas Maret ini.
5. Bapak Wahyu Purwo Raharjo, ST. MT, selaku koordinator Tugas Akhir
6. Seluruh Dosen serta Staf di Jurusan Teknik Mesin UNS, yang telah turut mendidik dan membantu penulis hingga menyelesaikan studi S1.
7. Bapak, Ibu, dan seluruh keluarga yang telah memberikan do'a restu, motivasi, dan dukungan material maupun spiritual selama penyelesaian Tugas Akhir.
8. Teman-teman teknik mesin angkatan 2009 beserta kakak dan adik angkatan di teknik mesin UNS.

*commit to user*

9. Semua pihak yang telah membantu dalam melaksanakan dan menyusun laporan Tugas Akhir ini yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak untuk memperbaiki dan menyempurnakan skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap, semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua dan bagi penulis pada khususnya.



Surakarta, Oktober 2013

Penulis



## DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul.....	i
Halaman Surat Penugasan.....	ii
Halaman Pengesahan.....	iii
Halaman Persembahan .....	iv
Abstrak .....	v
Kata Pengantar .....	vii
Daftar Isi .....	ix
Daftar Gambar .....	xi
Daftar Tabel.....	xiii
Daftar Notasi .....	xiv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah .....	2
1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian .....	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB II LANDASAN TEORI</b>	
2.1. Tinjauan Pustaka .....	5
2.2. Dasar Teori .....	13
2.2.1. Pendinginan Logam .....	13
2.2.2. Perpindahan Panas .....	14
2.2.3. Persamaan Atur Konduksi .....	14
2.2.4. Macam – Macam Kondisi Batas .....	15
2.2.5. Metode Beda Hingga .....	15
2.2.6. Metode ADI .....	19
2.2.7. Stabilitas Langkah Waktu.....	23
<b>BAB III PELAKSANAAN PENELITIAN</b>	
3.1. Alat dan Bahan yang Digunakan .....	24
3.1.1. Bahan .....	24

3.1.2. Alat .....	24
3.2. Garis Besar Pelaksanaan Penelitian .....	24
3.3 Diskritisasi Persamaan Atur Konduksi .....	26
3.3.1. X - Sweep .....	26
3.3.2. Y - Sweep .....	27
3.4. Domain dan Penentuan Kondisi Batas .....	28
3.4.1. Kondisi Batas Pada Dinding Dengan Batas Konveksi .....	29
3.4.2. Kondisi Batas Pada Sudut Luar Dengan Batas Konveksi.....	33
3.4.3. Kondisi Batas Pada Sudut Dalam Dengan Batas Konveksi.....	35
3.5. Stabilitas Langkah Waktu .....	36
3.6. Penyusunan Algoritma dan Bagan Alir Program.....	38
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1. Validasi Program.....	41
4.2. Simulasi Perpindahan Panas.....	43
<b>BAB V PENUTUP</b>	
5.1. Kesimpulan.....	50
5.2. Saran.....	50
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Distribusi temperatur pada (a) cetakan pasir, (b) cetakan mullite .....	5
Gambar 2.2 Fluks panas ( $W/m^2$ ) dalam (a) logam cor dengan cetakan pasir (b) logam cor dengan cetakan mullite.....	6
Gambar 2.3 Skema pemodelan.....	7
Gambar 2.4 Kurva pendinginan pada node 1 dan 2 .....	7
Gambar 2.5 Kurva pendinginan pada node 3 dan 4 .....	8
Gambar 2.6 Meshing pada software FEM .....	8
Gambar 2.7 Prediksi distribusi temperatur .....	9
Gambar 2.8 Skema pendinginan tekan paduan magnesium AM50 .....	10
Gambar 2.9 Kurva pendinginan dengan tekanan 0, 30, 60, and 90 MPa..	10
Gambar 2.10 Skema cetakan Aluminium.....	11
Gambar 2.11 Distribusi temperatur selama proses pembekuan Aluminium dalam cetakan pasir.....	12
Gambar 2.12 Kurva laju pendinginan pada pembekuan Aluminium.....	12
Gambar 2.13 Ilustrasi beda hingga untuk beda maju orde pertama T terhadap x.....	16
Gambar 2.14 Ilustrasi beda hingga untuk beda mundur orde pertama T terhadap x.....	17
Gambar 2.15 Ilustrasi beda hingga untuk beda tengah orde pertama T terhadap x.....	18
Gambar 2.16 Ilustrasi beda hingga untuk beda tengah orde kedua T terhadap x.....	19
Gambar 2.17 Skema metode ADI .....	20
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	25
Gambar 3.2 Domain simulasi.....	28
Gambar 3.3 Ilustrasi dinding dengan konveksi sebelah kanan .....	29
Gambar 3.4 Ilustrasi dinding dengan konveksi sebelah kiri .....	30
Gambar 3.5 Ilustrasi dinding dengan konveksi sebelah atas.....	31

Gambar 3.6 Ilustrasi dinding dengan konveksi sebelah bawah .....	32
Gambar 3.7 Ilustrasi sudut luar kanan atas dengan batas konveksi .....	33
Gambar 3.8 Ilustrasi sudut luar kiri atas dengan batas konveksi .....	33
Gambar 3.9 Ilustrasi sudut luar kanan bawah dengan batas konveksi .....	34
Gambar 3.10 Ilustrasi sudut luar kiri bawah dengan batas konveksi .....	35
Gambar 3.11 Ilustrasi sudut dalam kanan atas dengan batas konveksi.....	35
Gambar 3.12 Diagram alir program .....	40
Gambar 4.1 Domain simulasi.....	42
Gambar 4.2 (a) Hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga dengan $t_{\max} = 2.9$ s (b) Hasil simulasi menggunakan metode beda hingga dengan $t_{\max} = 2.9$ s .....	42
Gambar 4.3 (a) Hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga dengan $t_{\max} = 29.7$ s (b) Hasil simulasi menggunakan metode beda hingga dengan $t_{\max} = 29.7$ s .....	43
Gambar 4.4 (a) Hasil simulasi dengan cetakan pasir (b) Hasil simulasi dengan cetakan mullite .....	45
Gambar 4.5 Letak Grid.....	46
Gambar 4.6 (a) Distribusi temperatur di beberapa titik menggunakan cetakan pasir, (b) Distribusi temperatur di beberapa titik menggunakan cetakan mullite .....	47
Gambar 4.7 Letak sudut luar dan sudut dalam.....	48
Gambar 4.8 (a) Kurva pendinginan pada pojokan tembaga murni dengan cetakan pasir (b) Kurva pendinginan pada pojokan tembaga murni dengan cetakan mullite.....	49

**DAFTAR TABEL**

	Halaman
Tabel 4.1 Properti cetakan pasir .....	41
Tabel 4.2 Properti Aluminum.....	41
Tabel 4.3 Properti Tembaga murni .....	44
Tabel 4.4 Properti cetakan.....	44





## DAFTAR NOTASI

$A$	= Luas ( $m^2$ )
$Bi$	= Bilangan Biot
$C_p$	= Panas spesifik ( $J/kg.K$ )
$ Fo$	= Bilangan Fourier
$h$	= koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2.K$ )
$i,j$	= indeks nodal
$k$	= koefisien perpindahan panas konduksi ( $W/m.K$ )
$n$	= indeks waktu
$n_x$	= jumlah total grid pada arah x
$n_y$	= jumlah total grid pada arah y
$q$	= Fluks panas ( $J/s$ )
$t$	= variabel waktu (s)
$T$	= variabel temperatur (K)
$T_f$	= temperatur lingkungan (K)
$\alpha$	= difusivitas thermal ( $m^2/s$ )
$\epsilon$	= Emisivitas
$\sigma$	= Konstanta Boltzman
$\rho$	= massa jenis ( $kg/m^3$ )
$\Delta t$	= langkah waktu (s)
$\Delta x$	= jarak antar grid pada arah x (m)
$\Delta y$	= jarak antar grid pada arah y (m)

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang Masalah**

Dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi saat ini, dibutuhkan suatu solusi yang tepat dari permasalahan yang ada, terutama dalam bidang industri. Persoalan yang timbul adalah bagaimana membawanya ke dalam bentuk matematika sehingga nantinya dapat diselesaikan menggunakan metode matematika dengan memperhatikan berbagai syarat batasnya. Dalam kehidupan sehari-hari banyak dijumpai hal-hal yang berkaitan dengan perpindahan panas terutama dalam bidang industri.

Perpindahan panas merupakan salah satu bagian penting dalam permasalahan kalor atau panas. Perpindahan panas dapat terjadi pada sebuah benda ke benda lainnya yang bersentuhan maupun tidak apabila terjadi perbedaan temperatur antara kedua benda. Hal ini dapat berlangsung dalam tiga bentuk yang berbeda yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Peristiwa konduksi, konveksi dan radiasi selalu terjadi di alam dalam berbagai cara yang berbeda-beda. Meski dalam bentuk abstrak yang tidak terlihat namun dapat selalu dirasakan oleh panca indera manusia.

Banyak persoalan dalam bidang rekayasa dan teknik khususnya persoalan tentang perpindahan panas dengan bentuk model matematikanya adalah diferensial parsial. Salah satu persoalan yang melibatkan perpindahan panas adalah proses pembekuan logam. Untuk menyelesaikannya dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti analitis, eksperimen maupun dengan komputasi. Masing-masing metode mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Metode analitis memerlukan pemahaman matematika tingkat tinggi dengan melibatkan persamaan yang rumit serta memerlukan waktu yang lama. Metode eksperimen relatif memerlukan biaya yang mahal jika dibandingkan dengan metode komputasi. Salah satu pendekatan dalam menyelesaikan persoalan perpindahan panas adalah melalui metode analisis numerik. Pendekatan ini didasarkan pada teknik beda hingga yang sesuai untuk penyelesaian menggunakan komputer dengan kecepatan tinggi. Dalam menerapkan metode numerik terlebih dahulu persamaan perpindahan panas dirumuskan dengan persamaan diferensial, tujuannya adalah untuk

menentukan persamaan diferensial dengan syarat-syarat batasnya. Hal tersebut dilakukan dengan mengganti daerah yang kontinyu dengan pola titik-titik yang diskrit dengan menggunakan pendekatan beda hingga antara titik-titik tersebut.

## 1.2 Perumusan Masalah

Dari uraian latar belakang di atas maka masalah yang ingin diselesaikan adalah bagaimanakah menyelesaikan komputasi distribusi temperatur pada proses pendinginan tembaga murni dengan variasi cetakan pasir dan mullite secara 2 dimensi menggunakan metode beda hingga.

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah

- a. Permasalahan pada proses pendinginan tembaga murni yaitu distribusi temperatur selama proses pendinginan yang mengalami perpindahan panas secara konduksi dengan kondisi batas konveksi.
  - b. Persamaan yang digunakan adalah persamaan perpindahan panas konduksi dengan kondisi batas konveksi.
  - c. Kondisi batas lingkungan dengan temperature 300 K dengan koefisien perpindahan panas konveksi ( $h$ ) = 5.09 W/ m<sup>2</sup>.K.
  - d. Material yang digunakan adalah tembaga murni dengan temperatur logam cair 1358 K, konduktivitas termal, panas jenis dan massa jenis berupa fungsi temperatur, sedangkan untuk cetakan yang digunakan adalah pasir dan mullite dengan property masing – masing adalah
    - Pasir : Konduktivitas termal ( $k$ ) = 0,35 W/ m.K  
Panas jenis ( $c$ ) = 800 J/ kg.K  
Massa jenis ( $\rho$ ) = 1515 kg/ m<sup>3</sup>
    - Mullite : Konduktivitas termal ( $k$ ) = 6 W/ m.K  
Panas jenis ( $c$ ) = 780 J/ kg.K  
Massa jenis ( $\rho$ ) = 3100 kg/ m<sup>3</sup>
- Temperatur awal cetakan 300 K
- e. Analisis dilakukan secara 2 dimensi dengan menggunakan pendekatan beda hingga.

#### 1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari pelaksanaan penelitian ini adalah

- a. Untuk mengetahui distribusi temperatur pada proses pendinginan tembaga murni yang mengalami perpindahan panas dengan kondisi batas konveksi yang merambat melalui cetakan secara konduksi dengan simulasi sesara 2 dimensi menggunakan pendekatan beda hingga.
- b. Membandingkan hasil distribusi temperature pendinginan tembaga murni dengan cetakan pasir dan mullite.

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

- a. Untuk mengembangkan ilmu pengetahuan, terutama dalam bidang komputasi numerik dan perpindahan panas.
- b. Mampu menunjukkan bahwa metode beda hingga cukup akurat dalam memprediksi distribusi temperature pada proses pendinginan tembaga murni, sehingga analisis beda hingga dapat menjadi suatu pilihan dalam melakukan simulasi penelitian perpindahan panas.
- c. Memberikan kontribusi dalam bidang pengecoran logam khususnya dalam pertimbangan memilih bahan cetakan yang akan digunakan agar sifat-sifat logam hasil coran sesuai dengan yang diharapkan.

#### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan adalah

##### BAB I : PENDAHULUAN

Berisi dasar-dasar dan latar belakang pengambilan tugas akhir dan penyusunan skripsi.

##### BAB II : LANDASAN TEORI

Berisi tentang tinjauan pustaka, dasar teori perpindahan panas, kondisi batas dan penejelasan mengenai metode beda hingga.

##### BAB III : PELAKSANAAN PENELITIAN

Berisi tentang cara penelitian, penurunan persamaan konduksi dengan menggunakan metode beda hingga.

##### BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi data hasil simulasi dan pembahasannya.

*commit to user*

## BAB V : PENUTUP

Berisi tentang kesimpulan dan saran bagi peneliti selanjutnya.

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN

